

Rec'd PGT/PTO 20 JUN 2005

1011P03714094

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



REC'D 02 MAR 2004

WIPO

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 102 59 181.4

**Anmeldetag:** 18. Dezember 2002

**Anmelder/Inhaber:** Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung eV, 80636 München/DE

**Bezeichnung:** Verfahren zur Bewertung von Schweißverbindungen  
während des Schweißprozesses mit Hilfe der  
Ultraschallanalyse

**IPC:** G 01 N, B 23 K

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 15. Januar 2004  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Wallner

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

## **Anlage zur Erfindungsmeldung**

### **Verfahren zur Bewertung von Schweißverbindungen während des Schweißprozesses mit Hilfe der Ultraschallanalyse**

#### **Technisches Anwendungsgebiet**

Die Erfindung beschreibt ein Ultraschallverfahren zur Bewertung von Widerstandsschweißverbindungen während des Schweißens.

#### **Stand der Technik**

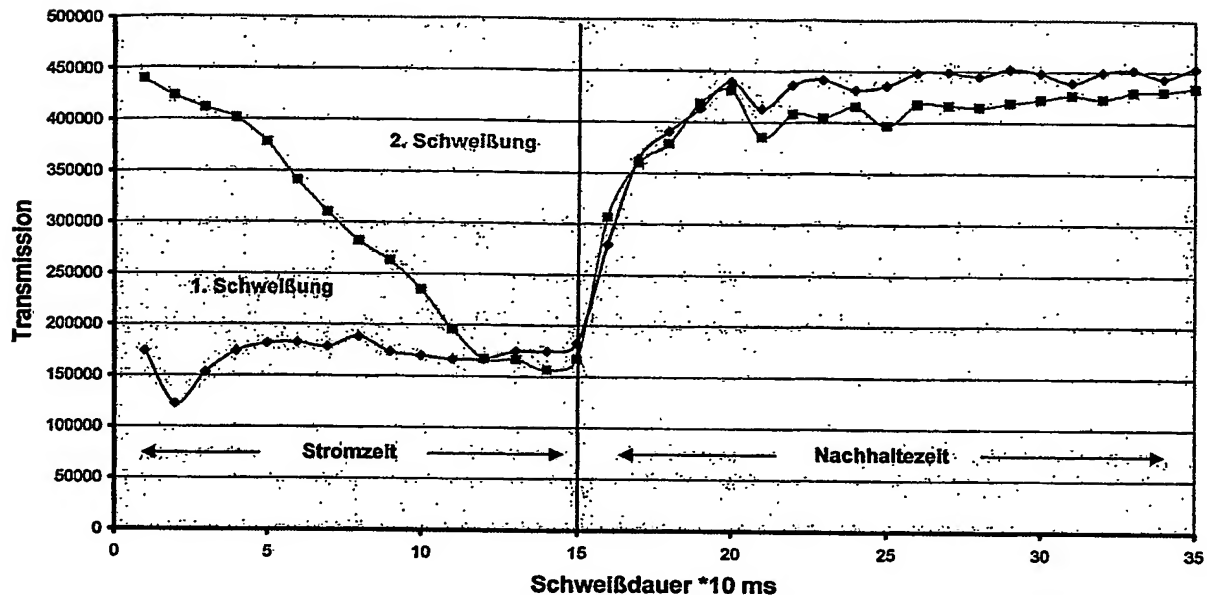
Stand der Technik ist ein Ultraschallverfahren /1/-/3/ das die Bewertung von Widerstandsschweißverbindungen während des Schweißens mit transversal polarisiertem Ultraschall durchführt:

Abb. 6 zeigt eine Anordnung zur Schweißpunktbewertung nach dem Stand der Technik. Die Schweißpunkte werden während des Schweißens von den Schweißelektroden aus durchschallt. Hierzu werden in eine der Schweißelektroden transversale Ultraschallimpulse eingeschlacht, diese durchlaufen die Elektroden und den Schweißpunkt und werden auf der Gegenelektrode mit einem Ultraschallempfänger empfangen /2/. Zielsetzung des Verfahrens ist es die Größe der Schweißlinse zu ermitteln. Diese Aufgabe wird nach dem Stand der Technik dadurch gelöst, dass der zeitliche Verlauf der transversalen Ultraschalldurchlässigkeit des Schweißpunktes zur Größenbestimmung der Schweißlinse ausgewertet wird. Wobei beim Stand der Technik davon ausgegangen wird, dass der Ultraschalldurchlässigkeitsverlauf des Schweißpunktes für transversale Ultraschallwellen wesentlich nur durch die Schweißlinsenbildung beeinflusst wird.

Die Aufgabe der Schweißlinsengrößenbestimmung wird nach dem Stand der Technik dadurch erschwert, dass die Ultraschalldurchlässigkeit der zu verschweißenden Teile nicht nur durch die Bildung der Schweißlinse beeinflusst wird, sondern auch durch die Erwärmung und Vergrößerung der Elektroden-Blech- und Blech-Blech-Kontaktzonen. Die Ultraschallübertragung an den Kontaktzonen ist stark von der Temperatur, dem Druck und der Kontaktfläche abhängig. Diese Parameter verändern sich während des Schweißvorganges.

Tatsächlich wird also die Ultraschalldurchlässigkeit der zu verschweißenden Teile nicht nur durch die Schweißlinsenbildung beeinflusst, sondern auch durch die Temperaturerhöhung der Kontaktzonen und deren Vergrößerung. Zur Veranschaulichung der Effekte, zeigt Abb. 1 den Temperatureinfluss und den Einfluss der Kontaktflächenvergrößerung auf die Ultraschalldurchlässigkeit eines Schweißpunktes.

### Durchlässigkeitsverlauf eines 1mm dicken Bleches



**Abb. 1**

Abb. 1 zeigt den Verlauf der Ultraschalldurchlässigkeit eines 1 mm dicken Einzelbleches beim zweimaligen Schweißen auf denselben Punkt. Die Schweißungen erfolgten mit einem Strom von 5 kA und einem Elektrodendruck von 2 kN. Der Durchmesser der Elektroden-Blech-Kontaktfläche beträgt etwa 4-5 mm. Schliffe zeigen, dass im Blech keine Schmelze gebildet wird.

Während der 1. Schweißung (blaue Kurve) ändert sich der Durchlässigkeitsverlauf in der Stromzeit nicht sehr. Die Schallschwächung durch die Temperaturerhöhung der Elektroden-Blech Kontakte und die Durchlässigkeitsverbesserung durch die Kontaktflächenvergrößerung heben sich praktisch auf. Erst mit Beginn der Nachhaltephase macht sich die in der Stromzeit stattgefundene Kontaktflächenvergrößerung bemerkbar. Der Durchlässigkeitsanstieg in der Nachhaltezeit, zeigt die Vergrößerung des Elektroden-Blech-Kontaktes an.

Bei der Wiederholenschweißung auf denselben Punkt (2. Schweißung, rote Kurve) ändert sich die Größe der Elektroden-Blech Kontaktflächen nicht, was daran zu erkennen ist, dass die Ultraschalldurchlässigkeit zu Beginn der Stromzeit und am Ende der Nachhaltezeit praktisch gleich groß ist. Die Schwächung der Durchlässigkeit während der Stromzeit wird hier allein durch die Temperaturerhöhung des Elektroden-Blech Kontaktes verursacht.

Am Durchlässigkeitsverlauf der Wiederholenschweißung ist nicht zu erkennen, ob die Schallschwächung durch Flüssigphasen (Schmelzungen) im Blechinneren verursacht wird, oder nur durch den Temperaturanstieg an den Elektroden-Blech-Kontakten. Im vorliegenden Fall kann mit dem Verfahren nach dem Stand der Technik nicht festgestellt werden, ob sich im Blechinneren eine Flüssigphase (Schmelze) gebildet hat.

### Mit der Erfindung gelöste Aufgabe

Die Ausführungen zum Stand der Technik zeigen, dass der Elektroden-Blech Kontakt den Verlauf der Ultraschalldurchlässigkeit während des Schweißens stark beeinflussen kann und eine Schweißpunktbewertung erschwert oder unmöglich macht.

- Die Erfindung löst die Aufgabe, die Ultraschalldurchlässigkeitsverläufe von den Kontakteinflüssen Elektrode-Blech (sowie den Einflüssen am Blech-Blech-Kontakt vor der Schmelze) zu befreien. Mit Hilfe der Erfindung ist es möglich, nur den Durchlässigkeitsverlauf am Blech-Blech-Kontakt, der durch Flüssigphasen ( Schmelze ) verursacht wird, zu ermitteln.

### Grundzüge des Lösungsweges

Die Erfindung nutzt folgende Erkenntnisse:

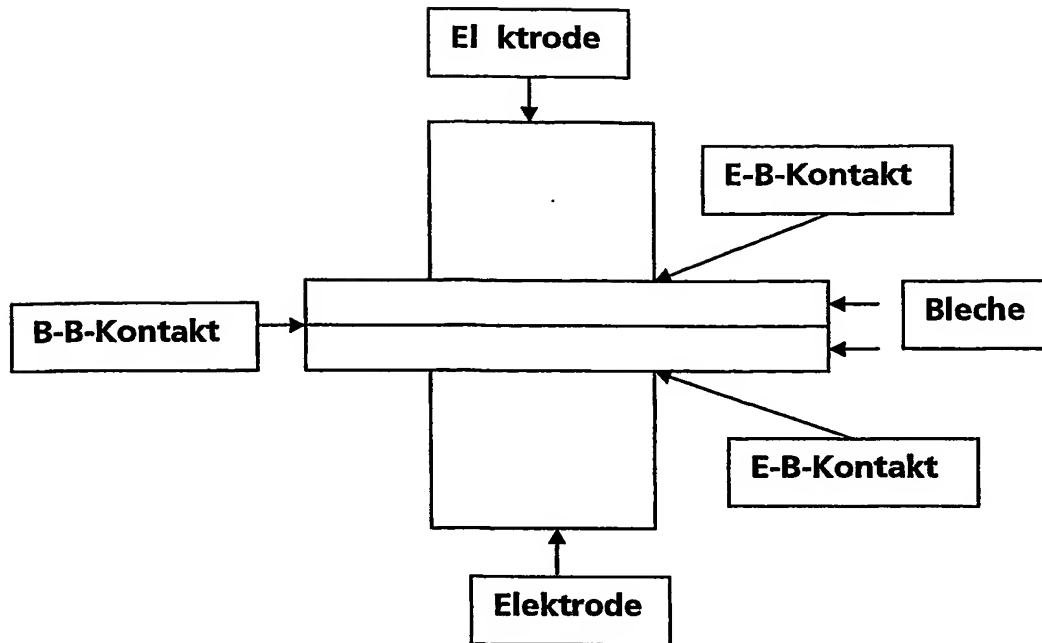
1. Die Ultraschallkontakte Elektrode-Blech und Blech-Blech sind keine idealen Kontakte, an denen die gesamte Fläche beteiligt ist, sondern sie bestehen aus einer Summe von Punktkontakten
2. Ideale Festkörperkontakte zeigen nur eine geringe temperaturabhängigkeit der Ultraschalldurchlässigkeit. Reale (unvollständige) Kontakte zeigen dagegen eine von der Kontaktqualität abhängige, Temperaturabhängigkeit der Ultraschalldurchlässigkeit. Je schlechter der Kontakt ist, desto stärker ist die Temperaturabhängigkeit der Ultraschalldurchlässigkeit des Kontaktes.
3. Die Ultraschallübertragung an realen Kontaktflächen wird durch das so genannte „Kontaktsteifigkeitsmodell“ beschrieben /4-6/.
4. Nach dem Kontaktsteifigkeitsmodell ist die Ultraschallübertragung an Festkörperkontakten nur wenig von der Wellenart (longitudinal oder transversal) abhängig. Nagy /6/ zeigt theoretisch, dass sich die Schallübertragung im Fall von „kissing bonds“, das sind Grenzflächen die unter Druck zusammengepresst werden, für beide Wellenarten nur wenig unterscheiden.
4. Der Durchlässigkeitsverlauf der zu verschweißenden Teile lässt sich als Produkt der Durchlässigkeiten der einzelnen durchschallten Zonen darstellen.
5. Flüssigkeiten übertragen keine Transversalwellen beeinflussen aber die Ausbreitung longitudinaler Schallwellen nicht wesentlich.

Mit den Erkenntnissen 1-5 lassen sich die Einflüsse der Kontaktzonen aus dem Ultraschalldurchlässigkeitsverlauf eliminiert, indem die Ultraschalldurchlässigkeit eines Schweißpunktes für longitudinale- und transversale Ultraschallwellen gemessen wird, was im Folgenden gezeigt werden soll:

Mit folgenden Abkürzungen wird die Ultraschalldurchlässigkeit als Produkt der einzelnen durchschallten Zonen dargestellt:

$EB_l(t)$  = Durchlässigkeit des Elektroden-Blech-Kontaktes für Longitudinalwellen  
 $EB_t(t)$  = „ „ für Transversalwellen  
 $BB_l(t)$  = Durchlässigkeit des Blech-Blech-Kontaktes für Longitudinalwellen  
 $BB_t(t)$  = „ „ für Transversalwellen  
 $Bl_l(t)$  = Durchlässigkeit des Blech-Inneren für Longitudinalwellen  
 $Bl_t(t)$  = „ „ für Transversalwellen

Die Abb. 2 zeigt skizzenhaft die Durchschallung eines Schweißpunktes.



**Abb.2**

Der Durchlässigkeitsverlauf der Longitudinalwelle  $D_l(t)$  und der Transversalwelle  $D_t(t)$  lässt sich wie folgt in Produktform darstellen:

- (1)  $D_l(t) = (EB)_l * (BB)_l * (BI)_l * (BE)_l = (EB)_l^2 * (BB)_l * (BI)_l$  für Longitudinalwellen  
 (2)  $D_t(t) = (EB)_t * (BB)_t * (BI)_t * (BE)_t = (EB)_t^2 * (BB)_t * (BI)_t$  für Transversalwellen

In dem die Durchlässigkeitsverläufe  $D_l(t)$  und  $D_t(t)$  zueinander ins Verhältnis gesetzt werden, vgl. Gl. (3), heben sich alle Einflüsse auf, die auf beide Wellenarten gleich wirken, z.B. die Kontaktflächenvergrößerung und der Temperaturanstieg in den Kontaktzonen. Die Ausdrücke  $BI_l$  und  $BI_t$  sind bei niedrigen Frequenzen und kurzen Laufwegen, bei denen die Schallschwächung keine Rolle spielt, ebenfalls gleich und kürzen sich.

$$(3) \quad \frac{D_l(t)}{D_t(t)} = \frac{(EB)_l^2(t) * (BB)_l(t) * (BI)_l(t)}{(EB)_t^2(t) * (BB)_t(t) * (BI)_t(t)}$$

$$(4) \quad \frac{D_l(t)}{D_t(t)} \approx f_1^2(t) * f_2(t)$$

Die Gl. (4) lässt sich auf zwei Terme reduzieren.  $f_1(t)$  beschreibt den Verlauf des Verhältnisses der Durchlässigkeiten der Elektroden-Blech-Kontakte, vgl. (5).  $f_1(t)$  kann sich durch eine Plastifizierung der EB- Kontakte zeitlich etwas ändern.  $f_2(t)$  beschreibt den Verlauf des Verhältnisses der Durchlässigkeiten am Blech-Blech-Kontakt, vgl. Gl. (6).

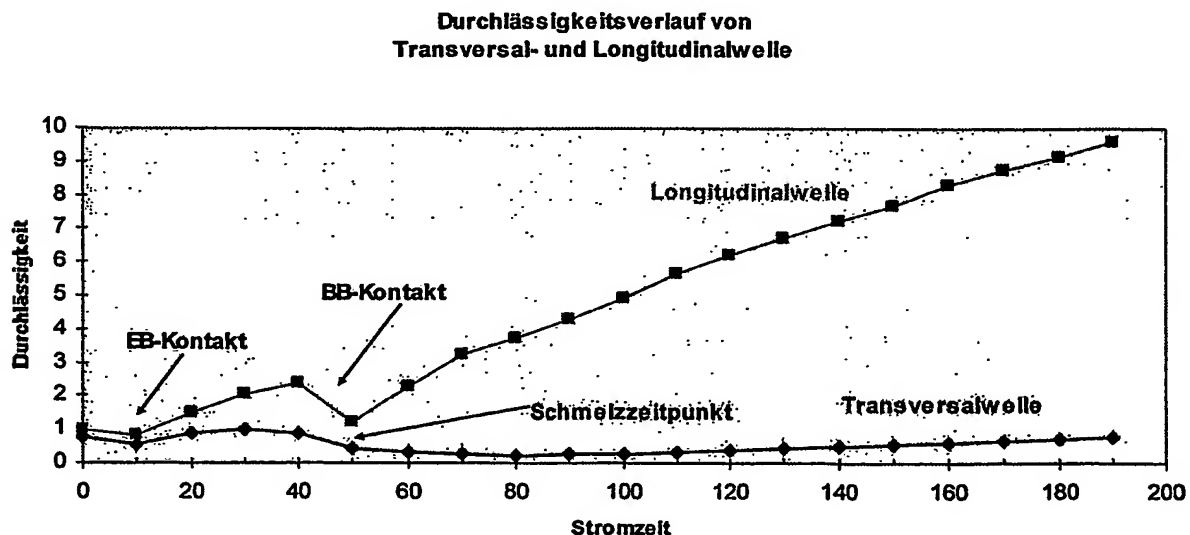
$$(5) \quad f_1(t) = \frac{EB_l}{EB_t}(t) \quad (6) \quad f_2(t) = \frac{BB_l}{BB_t}(t)$$

Der Term (6) zeigt eine große Änderung am fest-flüssig-Übergang, d.h. bei der Schweißblinsenbildung. Im Funktionsverlauf nach Gl. (4) sind die Kontakteinflüsse weitgehend eliminiert. Aus der Gl. (4) kann deshalb der fest-flüssig-Übergang an einem Sprung der Steigung leicht ermittelt werden.

Abb. 3 zeigt den Verlauf der longitudinalen und transversalen Durchlässigkeit eines Schweißpunktes an zwei 1mm dicken unbeschichteten Blechen. Die Einflüsse der EB- und BB-Kontaktzonen sind eingezeichnet. Zu Beginn der Schweißung macht sich für beide Wellenarten kurzzeitig die Temperaturbedingte Schallschwächung am EB-Kontakt bemerkbar. Infolge der EB-Kontaktflächenvergrößerung steigt die Durchlässigkeit trotzdem an. Nach ca. 30 – 40 ms wird die Schallschwächung durch Temperaturerhöhung am BB-Kontakt wirksam. Die BB-Kontaktfläche ist größer und wird deshalb später heiß als der EB-Kontakt. Mit Erreichen der Schmelztemperatur am BB-Kontakt zeigen die Durchlässigkeitsverläufe der longitudinalen und transversalen Wellen einen unterschiedlichen Verlauf. Die Durchlässigkeit der Longitudinalwelle steigt weiter nahezu kontinuierlich an, bedingt durch die Vergrößerung der EB-Kontaktfläche. Die Durchlässigkeit der Transversalwelle zeigt einen bleibenden Einbruch, vgl. auch Abb. 5, was durch die Schmelze (Schweißlinse) am BB-Kontakt verursacht wird.

Zum Schmelzzeitpunkt am Blech-Blech-Kontakt wird die kontaktbedingte Schwächung der Longitudinalwelle durch den Übergang zum idealen Flächenkontakt aufgehoben, weshalb die longitudinale Durchlässigkeit hier an steigt, vgl. (Abb. 3). Damit erklärt sich der kurze Einbruch und anschließenden Anstieg im Durchlässigkeitsverlauf der Longitudinalwelle zum Schmelzzeitpunkt am BB-Kontakt.

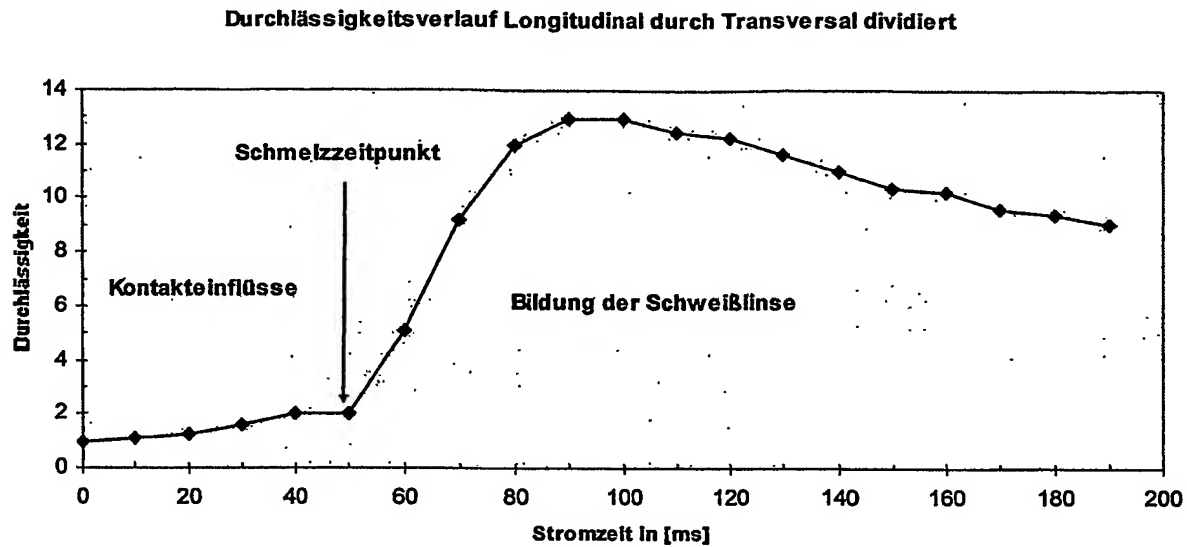
Ähnlich wie die Longitudinalwelle verhält sich der Durchlässigkeitsverlauf der Transversalwelle. Mit Erreichen der Schmelztemperatur und der Entstehung einer Flüssigphase am BB-Kontakt wird die Transversalwelle jedoch an der Schmelze total reflektiert, die transversale Durchlässigkeit am Schweißpunkt sinkt deshalb weiter ab, vgl. Abb.3.



**Abb. 3**

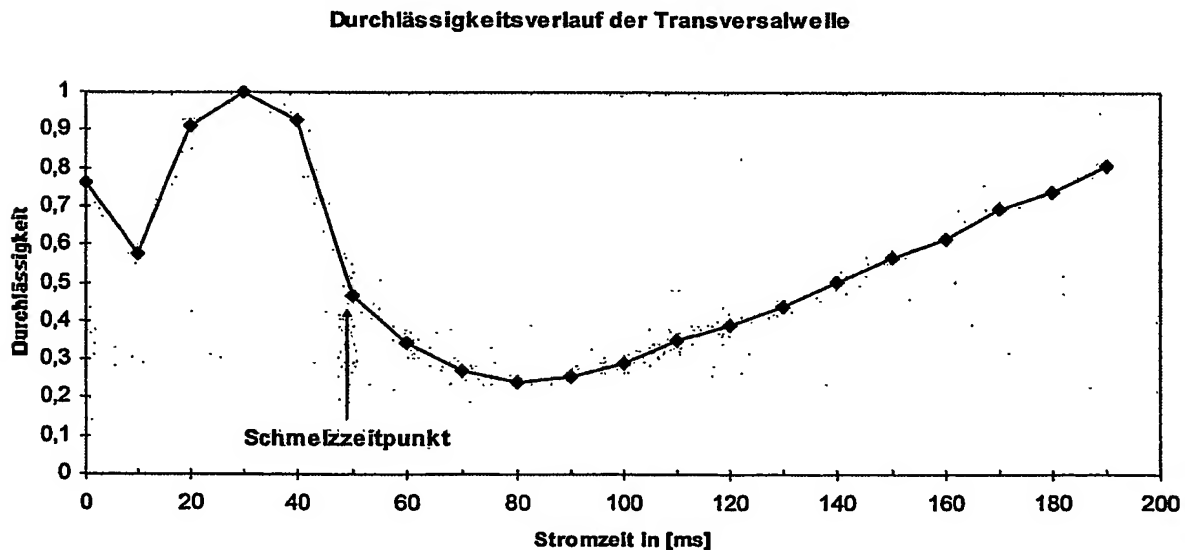
Dividiert man den Verlauf der longitudinalen- durch die transversale Durchlässigkeit, dann erhält man einen Funktionsverlauf entsprechend der Gl. (3) bzw. (4). Der Verlauf ist in Abb. 4. dargestellt. Der Schmelzzeitpunkt wird in Abb. 4 durch eine starke Steigungsänderung deutlich angezeigt.

Im transversalen Durchlässigkeitsverlauf, vgl. Abb. 3 und 5, ist dieser Punkt nicht so deutlich zu erkennen, da er vom EB- Kontakteinfluss überlagert wird.



**Abb. 4**

Abb. 4 zeigt der Durchlässigkeitsverlauf der dem Ausdruck der Gl. 3 bzw. 4 entspricht.



**Abb. 5**

Abb. 5 zeigt den bereits in Abb. 3 dargestellten Durchlässigkeitsverlauf der Transversalwelle in einem kleineren Maßstab.

Zur Detektion der Schmelze kann die Steigung des Funktionsverlaufesverlaufes nach Gl. (4) herangezogen werden. Beim Auftreten einer Schmelze muss die Steigung des Funktionsverlaufes nach Gl. (4) eine bestimmte positive Änderung erfahren.

Die Problemlösung besteht also darin, den Durchlässigkeitsverlauf der Schweißteile für longitudinale und transversale Ultraschallwellen zu bestimmen und aus beiden Verläufen die Kontakt-

einflüsse zu Eliminieren. Eine Möglichkeit besteht darin, entsprechend der Gl. (3) das Verhältnis der Durchlässigkeitsverläufe der Transversalwelle  $D_T(t)$  und der Longitudinalwelle  $D_L(t)$  zu bilden.

### **Verbesserungen und Vorteile gegenüber dem Stand der Technik**

Die Elimination der Kontakteinflüsse aus dem Durchlässigkeitsverlauf vereinfacht die Schweißpunktbewertung, weil in dem bereinigten Durchlässigkeitsverlauf die Flüssigphasen einfacher zu erkennen und zu bewerten ist.

In manchen Anwendungen ist beispielsweise nur die Feststellung wichtig, ob eine Flüssigphase vorliegt oder nicht.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren werden die Einsatzmöglichkeiten des Ultraschallverfahrens zur Schweißpunktbewertung erweitert:

1. Mit der Verbesserung werden **Mehrimpulsschweißungen** bewertbar, die nach dem Stand der Technik nicht bewertbar sind, vgl. Abb. 1.
2. Die Vorteile des Verfahrens werden dort wirksam, wo der Kontaktflächeneinfluss groß ist im Vergleich zum Einfluss der Flüssigphasen. Ein Beispiel ist das **Mikrofügen**.
3. Neue Anwendungsfelder ergeben sich dort, wo der Kontaktzoneneinfluss und die Bildung der Flüssigphase (Schmelze) zeitlich nicht getrennt werden können, wie es bei kurzen Schweißzeiten der Fall ist, z.B. bei **Kondensatorentladungsschweißungen**.
4. Ein weiteres Anwendungsfeld liegt dort, wo während des Schweißens große Veränderungen der Kontaktflächen zwischen den Schweißelektroden und den Schweißteilen auftreten, z.B. bei **Buckelschweißungen**. Hier war die Bewertung bisher schwierig und kann mit dem neuen Verfahren verbessert werden.
5. Weitere Beispiele sind Schweißungen von **Drähten auf Blech** oder **Drähten auf Drähte**. In diesen Fällen verändern sich die Kontaktflächen Elektrode-Schweißteil während des Schweißens.

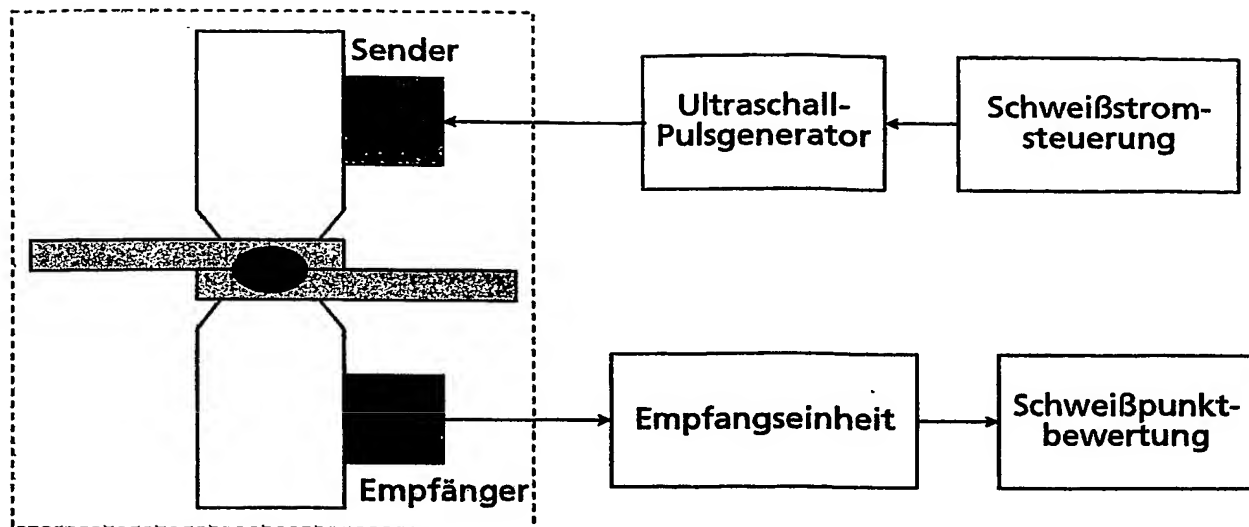
### **Ausführungsbeispiele**

Das Verfahrensprinzip beruht auf der gleichzeitigen Bestimmung und Auswertung der longitudinalen- und transversalen Durchlässigkeitsverläufe. Die Bestimmung der Durchlässigkeitsverläufe für beide Wellenarten kann auf verschiedene Weise realisiert werden.

Prinzipiell entstehen bei der Schallausbreitung in räumlich begrenzten Festkörpern durch die Reflexion der Schallwellen an den Begrenzungsflächen immer auch die andere Wellenart. D.H. bei der Ausbreitung einer Transversalwelle entsteht auch ein gewisser longitudinaler Anteil und umgekehrt. Diesen Anteil kann man durch den Einschallwinkel und die Form des Ausbreitungsmediums beeinflussen. Aus diesem Grund gibt es viele Möglichkeiten das erfindungsgemäße Verfahren zu realisieren

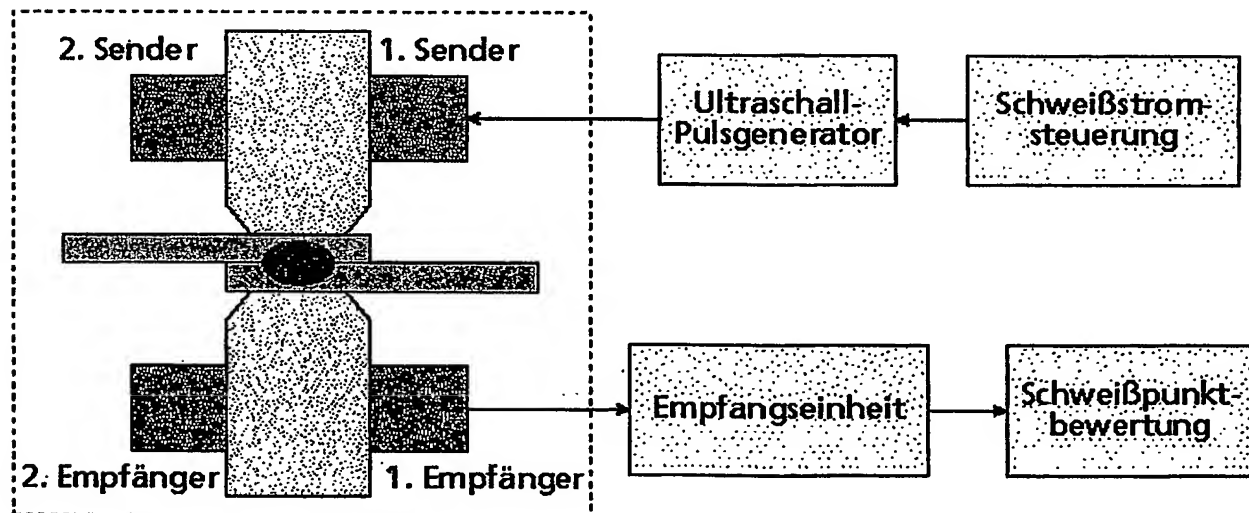
Die Abb. 6 zeigt das Blockdiagramm des Verfahrens nach dem Stand der Technik. In diesem Fall wird durch die Sendesonde vorzugsweise eine Transversalwelle angeregt. Die Longitudinalwelle muss durch die Schallausbreitung des Sendesignals in der Elektrode bzw. im Schweißteil entstehen.





**Abb. 6 Ausführungsbeispiel der Standardmessanordnung**

Abb. 7 zeigt eine Anordnung bei der das longitudinale und das transversale Sendesignal mit getrennten Prüfköpfen gesendet und empfangen wird.



**Abb. 7 Modifizierte Messtechnik**

Die Anzahl der notwendigen Sende- und Empfangssonden hängt von der Geometrie der Elektroden und der Schweißteile ab und von der Möglichkeit, mit einem Prüfkopf beide Wellenarten zu senden und zu empfangen. Prinzipiell ergeben sich folgende Möglichkeiten der Signalerzeugung und des Signalempfangs:

- Die Verwendung von zwei Sendesonden und zwei Empfangssonden
- Die Verwendung von zwei Sendesonden und einer Empfangssonde

- Die Verwendung der Anordnung nach dem Stand der Technik mit einer Sendesonde und einer Empfangssonde.

Bei der Verwendung von verschiedenen Empfangssonden liegen die Empfangssignale bereits in getrennter Form vor. Bei nur einer Empfangssonde muss das empfangene Signal in seine longitudinalen und transversalen Anteile zerlegt werden. Dies kann dadurch geschehen, dass das Empfangssignal in zwei verschiedenen Zeitfenstern ausgewertet wird.

Die Auswertung des Empfangssignals ist auch in einem gemeinsamen Zeitfenster möglich, wenn sich der longitudinale und der transversale Signalanteil in unterschiedlichen Frequenzbereichen befindet. In diesem Fall können beide Anteile durch eine Frequenzfilterung des Empfangssignals getrennt werden.

Die Signalverläufe in Abb. 3, 4 und 5 wurden mit einer Anordnung nach dem Stand der Technik erhalten, wobei das Empfangssignal breitbandig empfangen und anschließend digital gefiltert wurde. Das transversale Empfangssignal wurde mit einem Tiefpass von 150 kHz ausgefiltert und das longitudinale über einen Hochpass von 300 kHz. Die im vorliegenden Fall erreichte Trennung beider Signalanteile ist nicht optimal.

Die Erzeugung und der Empfang beider Wellenarten ist nicht Gegenstand der Erfindung. Sie kann, wie bereits beschrieben, auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Je besser die Durchlässigkeitsverläufe für beide Wellenarten ermittelt werden, desto besser ist die Korrektur des Kontaktflächeneinflusses.

## Literatur

- /1/ DE 43 25 856 A1  
Verfahren zur Bewertung von Schweißverbindungen
- /2/ DE 43 25 858 A1  
Anordnung zur Ultraschalleinbringung bei der Ultraschallanalyse von Widerstandsschweißverbindungen
- /3/ DE 43 25 878 A1  
Verfahren zur Bewertung von Widerstandsschweißverbindungen
- /4/ J.-M. Baik, R.B. Thompson, Ultrasonic scattering from imperfect interfaces: A Quasi Static Model; J. Nondestr. Eval. 4 (1984), 177ff
- /5/ Kendall, K.; Tabor, D.: Proc. Roy. Soc. Lond. A 323, 321 (1971)
- /6/ Peter B. Nagy „Ultrasonic Classification of Imperfect Interfaces“  
J. NDE, S. 127, Vol. 11, 1992